

УДК: 621.31

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ НЕКАЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Ю. Г. Качан

Запорожская государственная инженерная академия
просп. Ленина, 226, г. Запорожье, 69006, Украина

А. В. Николенко, В. В. Кузнецов

Национальная металлургическая академия Украины
просп. Гагарина, 4, г. Днепропетровск, 49600, Украина. E-mail: wit_jane2000@mail.ru

Обоснована целесообразность использования одномассовой динамической тепловой модели с выходным параметром температура лобовых частей обмоток статора. Произведена оценка адекватности тепловой модели асинхронного двигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии. Приведены результаты экспериментов, проведенных в лабораторных условиях. Представлены сравнительные кривые нагрева, полученные экспериментально и на модели.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тепловая модель.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ ТЕПЛОВОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА, ЩО ПРАЦЮЄ В УМОВАХ НЕЯКІСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Ю. Г. Качан

Запорізька державна інженерна академія
просп. Леніна, 226, м. Запоріжжя, 69006, Україна

А. В. Ніколенко, В. В. Кузнецов

Національна металургійна академія України
просп. Гагаріна, 4, м. Дніпропетровськ, 49600, Україна. E-mail: wit_jane2000@mail.ru

Обгрунтовано доцільність використання одномасової динамічної теплової моделі з вихідним параметром температура лобових частин обмоток статора. Проведена перевірка адекватності теплової моделі асинхронного двигуна, що працює в умовах неякісної електроенергії. Наведені результати експериментів, проведених в лабораторних умовах. Представлені порівняльні криві нагріву, отримані експериментально і на моделі

Ключові слова: асинхронний двигун, тепла модель.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Низкое качество электроэнергии в цехах промышленных предприятий обуславливает рост прямых производственных затрат вследствие увеличения объемов ее потребления. Помимо этого возрастают и косвенные затраты, связанные с сокращением сроков службы электрических машин. Как известно, последние определяются, главным образом, температурным состоянием асинхронного двигателя (АД) [1]. Наиболее чувствительным к нагреву элементом двигателя является изоляция обмоток. Даже при незначительном превышении допустимого значения температуры ускоряются процессы старения, повышается вероятность электрического пробоя.

Целью работы является оценка адекватности тепловой модели асинхронного двигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для исследования влияния режимов работы электродвигателя на его температурное состояние применяются т. н. тепловые модели [2, 3]. Они представляют собой схему замещения, источниками тепла в которой служат электрические потери, в узлах находятся температуры конструктивных элементов, а между ними лежат соответствующие тепловые проводимости и емкости. Рассматриваемые модели имеют разную степень детализации. Наиболее простой является одномассовая модель, в которой электромеханический преобразователь представляется как единое однородное тело с общей температурой.

Хотя в действительности присутствует неоднородность распределения температур: температура изоляции обмотки статора АД может превышать температуру корпуса на 15-20 °С [4].

Более детальные модели имеют меньшую погрешность прогноза, однако для этого необходимы дополнительные данные о тепловых проводимостях и емкостях отдельных конструктивных элементов двигателя. Такие модели применяются, как правило, только на стадии проектирования. Кроме того, при использовании последних рассматривается установившееся тепловое состояние без учета его динамики.

На наш взгляд, в условиях эксплуатации наиболее целесообразно использование одномассовой динамической тепловой модели, причем в качестве ее выходного параметра необходимо рассматривать температуру критического по нагреву элемента АД – лобовых частей обмоток статора. Как известно, они находятся в наихудших по охлаждению условиях, поскольку их теплоотдача осуществляется, главным образом, через воздух.

Одномассовая динамическая тепловая модель АД описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\Delta P = A\tau + \frac{\Delta\tau}{\Delta t} C, \quad (1)$$

где ΔP – мощность греющих потерь, выделяющихся в электродвигателе; τ – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды;

Δt – приращение температуры двигателя, произошедшее за время Δt ; A – коэффициент теплоотдачи, Дж/(сек °C) (равен количеству тепла, отдаваемому в окружающую среду за 1 секунду при разнице указанных температур $\tau = 1^\circ\text{C}$); C – теплоемкость двигателя, Дж/°C. Указанная теплоемкость равна количеству тепла, необходимого для нагрева АД на 1°C при отсутствии теплоотдачи в окружающую среду.

Как видно, в уравнении теплового баланса (1) имеются две неизвестные величины – A и C , которые могут быть найдены по экспериментальным данным путем составления системы уравнений относительно неизвестных. При этом повышение точности определения коэффициента теплоотдачи и теплоемкости двигателя достигается за счет использования сумм измеренных параметров в нескольких опытах:

$$\begin{cases} \frac{\sum \Delta P}{N} = A \sum \tau + \sum \frac{\Delta \tau}{\Delta t} C; \\ \frac{\sum \Delta P \tau}{N} = A \sum \tau^2 + \sum \frac{\Delta \tau}{\Delta t} \tau C. \end{cases} \quad (2)$$

Соответствующие эксперименты проведены в условиях лаборатории электромеханических систем кафедры энергетического менеджмента Запорожской государственной инженерной академии.

В качестве исследуемого рассмотрен асинхронный двигатель типа 4АХ80А4У3 (номинальные параметры: $U_H=220/380\text{ В}$ (Δ/Y), $P_H=1,1\text{ кВт}$, $n_H=1400\text{ об/мин}$, $I_H=4,8/2,8\text{ А}$, $\eta=75\%$, $\cos\phi=0,81$). Двигатель нагружен на генератор постоянного тока типа ПЗ1У4 (номинальные параметры $U_H=230\text{ В}$, $P_H=1,0\text{ кВт}$, $n_H=1450\text{ об/мин}$, $I_H=4,3\text{ А}$, $\eta=75\%$). В процессе опытов АД нагревался при работе под номинальной нагрузкой, а остывал при невращающемся роторе.

В крышке двигателя было сделано отверстие для определения температуры лобовых частей обмоток с помощью лазерного пирометра типа Fluke 568. Токи и напряжения регистрировались с помощью мобильного измерительно-диагностического комплекса на базе датчиков тока типа LA 25А, датчиков напряжения – LV100Р (производство фирмы LEM, Швейцария) и АЦП Е-440 (L-CARD, Россия). Одна из полученных в результате кривая нагрева исследуемого двигателя приведена в качестве примера на рис. 1. Как видно, установившееся значение температуры двигателя ($76,3^\circ\text{C}$) достигается за 62 минуты.

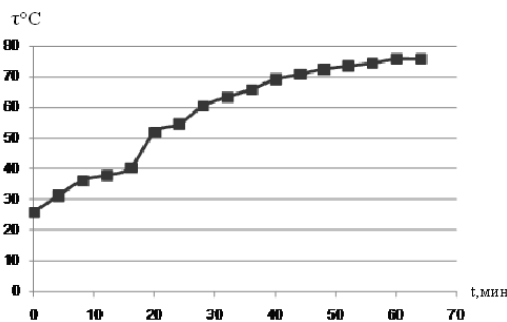


Рисунок 1 – Кривая нагрева АД при работе под номинальной нагрузкой с идеальным питанием

По результатам опытов составлена система уравнений (2) и произведен расчет параметров однофазной тепловой модели. Расчетные значения величин составили: коэффициент теплоотдачи двигателя – $A=11,2\text{ Дж/(сек }^\circ\text{C)}$, теплоемкость электродвигателя $C=12,1\text{ кДж/}^\circ\text{C}$. Учитывая, что в справочной литературе имеются крайне скудные данные о тепловых параметрах электрических машин (как правило, приводятся только тепловые постоянные времени для двигателей отдельных классов и диапазонов мощностей), рассмотренный способ их определения в процессе идентификации модели конкретного АД является достаточно актуальным.

Последующие опыты проведены при различной степени искажения питания электродвигателя. Показатели качества последнего (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения k_U , коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности ε_2) приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Показатели качества электроэнергии в опытах и установившееся значение температуры обмотки АД

№ опыта	Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения $k_U, \%$	Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности $\varepsilon_2, \%$	Установившаяся абсолютная температура, $\tau^\circ\text{C}$
1	0	0	76,3
2	0	4	85,1
3	8	0	92,5
4	13,0	0	117,8

Опыт № 4 соответствует работе двигателя с температурой, превышающей допустимую для данного класса изоляции $F(105^\circ\text{C})$, и нахождение АД в таком состоянии может быть только кратковременным, так как возможен тепловой пробой его обмоток. Вид фазных напряжений, соответствующий этому максимальному искажению, показан на рис. 2.

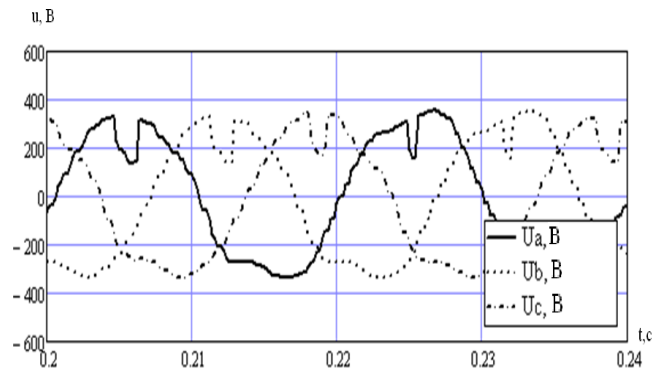


Рисунок 2 – Фазные напряжения в опыте № 4

В качестве примера на рис. 3 представлен график превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды ($25,7^\circ\text{C}$) в опыте нагрева.

Кроме того, показана расчетная кривая температуры, полученная с помощью последовательного совмещения электромеханической модели асинхронного двигателя [5] и его тепловой модели [6]. Здесь величина потерь на выходе первой из них служит входным параметром второй, на выходе которой и получается значение рассматриваемого превышения температуры электродвигателя.

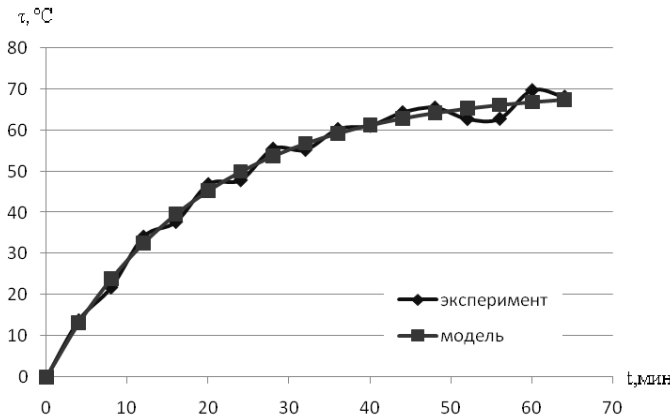


Рисунок 3 – Кривые нагрева двигателя в опыте № 3 ($k_U = 8 \%$, $\varepsilon_2 = 0 \%$).

Далее был произведен расчет погрешности прогнозируемого значения температуры в динамике нагрева. На рис. 4 показаны экспериментальные и расчетные (прогнозируемые) значения температуры для всех проведенных опытов, которые и использовались для проверки адекватности модели по методу, изложенному в [7]. Здесь различный формат маркеров относится к соответствующим опытам.

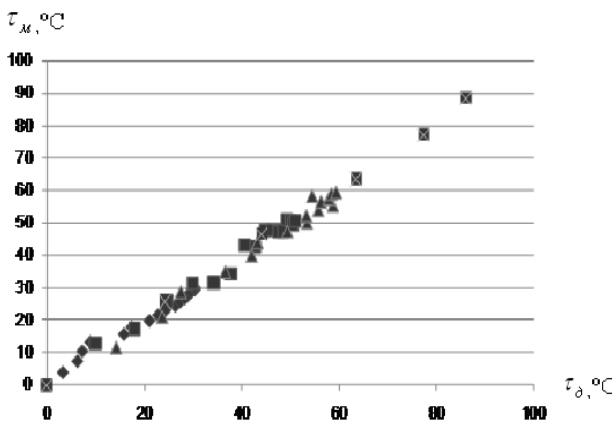


Рисунок 4 – Взаимосвязь прогнозируемых τ_i и экспериментальных τ_d значений превышения температуры обмотки АД

Проведенная проверка адекватности предполагает получение следующего уравнения линейной регрессии:

$$Y_n^* = a_0 + a_1 Y_d, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= \bar{Y} - r_{Y_d Y_n} s_{Y_n} / s_{Y_d} \bar{Y}_d; \\ a_1 &= r_{Y_d Y_n} \sigma_{Y_n} / \sigma_{Y_d}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь \bar{Y}_n, \bar{Y}_d – средние значения прогнозируемых и действительных величин; $r_{Y_d Y_n}$ – коэффициент корреляции между ними; $\sigma_{Y_n}, \sigma_{Y_d}$ – среднеквадратичные отклонения.

Указанные параметры вычислялись по формулам:

$$r_{Y_d Y_n} = \frac{\sum_1^L (Y_d - \bar{Y}_d)(Y_n - \bar{Y}_n)}{L \sigma_{Y_d} \sigma_{Y_n}}; \quad (5)$$

$$\sigma_{Y_d} = \sqrt{\sum_1^L (Y_d - \bar{Y}_d)^2 / (L-1)}; \quad (6)$$

$$\sigma_{Y_n} = \sqrt{\sum_1^L (Y_n - \bar{Y}_n)^2 / (L-1)}, \quad (7)$$

где $L=57$ – объем статистической выборки (количество замеров температуры во всех опытах).

Среднеквадратическая абсолютная ошибка измерений определялась как

$$\Delta Y_n = t_p \sigma_{Y_n}^*, \quad (8)$$

где t_p – коэффициент Стьюдента для заданной надежности и числа степеней свободы $k = L-1$. В рассматриваемом случае надежность принималась $p = 0,05$. Здесь $\sigma_{Y_n}^*$ – остаточное среднеквадратичное отклонение, вычисляемое по формуле:

$$\sigma_{Y_n}^* = \sqrt{\sum_1^L (Y_n - Y_n^*)^2 / (L-1)}. \quad (9)$$

Среднеквадратическая относительная ошибка прогноза определялась следующим образом:

$$\delta_{Y_n} = |\Delta Y_n| / Y_{n \max} 100\%, \quad (10)$$

где $Y_{n \max}$ – наибольшее значение прогнозируемой величины.

Полученные в результате значения: $\sigma_{Y_d} = 21,2^\circ C$, $\sigma_{Y_n} = 20,9^\circ C$, $r_{Y_d Y_n} = 0,99$, $\sigma_{Y_n}^* = 2,34^\circ C$, $\Delta Y_n = 0,28^\circ C$, $\delta_{Y_n} = 3,2 \%$.

ВЫВОДЫ. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности предложенной тепловой модели АД, работающего в условии некачественной электрической энергии. Учитывая, что для многих типов двигателей в справочной литературе отсутствуют сведения о коэффициентах теплоотдачи и теплоемкости, а по отдельным приводятся только тепловые постоянные времени, значения указанных параметров модели могут быть получены по использованной в статье методике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат. – 2000. – 340 с.
2. Борисенко А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
3. Проектирование электрических машин / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 495 с.
4. Рыжков А.А. Определение параметров тепловой схемы замещения асинхронного двигателя на базе экспериментальных данных / Проблемы автоматизированного электропривода: теория и практика. Сб. науч. тр. Днепродзерж. гос. техн. ун-та (техн. науки), темат. вып. – Днепродзержинск, 2007. – С. 156.
5. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2009. – Вып. 3/2009 (63). – С. 56–58.
6. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. Тепловая составляющая экономического ущерба от работы асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергетики // Гірн. електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 85. – С. 9–16
7. Корн Г., Корн Е. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 831 с.

IDENTIFICATION OF PARAMETERS AND CHECK OF ADEQUACY OF THERMAL MODEL OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR WORKING IN THE CONDITIONS OF THE UNQUALITY ELECTRIC POWER

Y. Kachan

Zaporizhzhya State Engineering Academy
prosp. Lenina, 226, Zaporizhzhya, 69006, Ukraine

A. Nikolenko, V. Kuznetsov

National Metallurgical Academy of Ukraine
prosp. Gagarina, 4, Dnipropetrovsk, 49600, Ukraine. E-mail: wit_jane2000@mail.ru

The expediency of using single-mass dynamic thermal model with an output parameter of the temperature of coil ends of the stator windings. The article is devoted to check of adequacy of thermal model of the asynchronous motor working in the conditions of the unquality electric power. The results of experiments conducted in laboratory conditions. The comparative heating curves obtained experimentally and the model.

Key words: asynchronous engine, the thermal model.

REFERENCES

1. Zhezhelenko I.V. *Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises.* – М.: Energoatomizdat. – 2000. – 340 p. [in Russian]
2. Borisenko A.I. *Cooling of industrial electrical machinery.* – М.: Energoatomizdat, 1983. – 296 p. [in Russian]
3. *Design of electrical machines* / Ed. I.P. Kopylov. – М.: Energiya, 1980. – 495 с. [in Russian]
4. Ryzhkov A.A. Defining the parameters of the thermal equivalent circuit of induction motor based on experimental data / *Problems of automated electric drive: theory and practice. Sat researcher. Works Dneprodzerzh. State. Technical. University (tehn. science), themat. iss.* – Dneprodzerzhinsk, 2007. – PP. 156. [in Russian]
5. Kachan J.G., Nikolenko A.V. Kuznetsov V.V. Realization of an induction motor model for the conditions of poor nutrition // *Bulletin of the Kremenchuk State Polytechnic University.* – 2009. – Iss. 3/2009 (63). – PP. 56–58. [in Russian]
6. Kachan Y.G., Nikolenko A.V. Kuznetsov V.V. The thermal component of the economic damage from an induction motor in a low-quality energy // *Mining electromechanics and automation: scient.-technical collection.* – 2010. – Iss. 85. – PP.9–16. [in Russian]
7. Korn G., Korn, E. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers.* – М.: Nauka, 1984. – 831 p. [in Russian]

Стаття надійшла 11.02.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Чорним О.П.